5 种常绿冬青叶片防火性能评价

杨丁[1]，郝明灼[1,2,4*]，侯召斌[3]，喻方圆[1]，梁有旺[1]，邹义萍[4]，张玉[1]
（1. 南京林业大学林学院，江苏南京 210037；2. 国家林业局和草原局冬青工程技术研究中心，浙江杭州 311300）；3.南京森林警察学院，江苏南京 210023；4.江苏青好景观园艺有限公司，江苏南京 211225）

摘要：为筛选冬青属植物优良防火品种，了解该属植物叶片燃烧表现特征，优化园林树种防火性能评价方法，该文以克恩氏冬青（*Ilex* × *koehneana*）、史蒂芬冬青（*Ilex* ‘Nellie R. Stevens’）、大别山冬青（*Ilex dabieshanensis*）、博福德冬青（*Ilex cornuta* ‘Burfordii’）、双核冬青（*Ilex dipyrena*）为研究对象，以海桐（*Pittosporum tobira*）和石楠（*Photinia serrulata*）作为参照，采用因子分析法对这 7 种植物鲜叶和干叶的防火性能分别进行综合评价。结果表明：（1）不同冬青品种鲜叶火灾性能指数存在显著性差异，其余指标均呈极显著性差异。（2）经过因子分析进行评价分析得出：鲜叶抗火性从强到弱依次为博福德冬青＞史蒂芬冬青＞大别山冬青＞石楠＞海桐＞双核冬青＞克恩氏冬青；干叶抗火性从强到弱依次为史蒂芬冬青＞大别山冬青＞博福德冬青＞海桐＞双核冬青＞克恩氏冬青＞石楠。（3）综合鲜叶及干叶的评分结果，得出博福德冬青、史蒂芬冬青、大别山冬青得分较高，防火性能优于石楠和海桐，防火性能表现更突出。

关键词：防火性，常绿冬青，锥形量热仪，因子分析，含水率，火灾性能指数

Fire resistance evaluation of five evergreen hollies’ leaves

YANG Ding[1], HAO Mingzhuo[1,2,4*], HOU Zhaobin[3], YU Fangyuan[1], LIANG Youwang[1], ZOU Yiping[4], ZHANG Yu[1]
(1. *College of Forest Sciences, Nanjing Forestry Natural*, Nanjing 210037, China; 2. *Holly Engineering Center of State Forestry and grassland Administration*, Hangzhou 311300, China; 3. *Nanjing Forest Police College*, Nanjing 210023, China; 4. *Jiangsu Qinghao Landscape Horticulture Co., Ltd.*, Nanjing 211225, China)

Abstract: In order to select the excellent fire-resistant tree species of *Ilex*, acquaint the characteristics of burning process of the leaves of different cultivated varieties, optimize the evaluation methods of fire-resistant potentialities for landscape tree species, fresh and dry leaves of *Ilex* × *koehneana*, *Ilex* ‘Nellie R. Stevens’, *Ilex dabieshanensis*, *Ilex cornuta* ‘Burfordii’ and *Ilex dipyrena* were tested in burning experiment, and *Pittosporum tobira* and *Photinia serrulata* were choose as reference tree species. 15 indexes such as water content of leaves, heat release rate of fresh and dry leaves, ignition time of fresh and dry leaves and so on were measured by cone calorimeter, fire resistance potentialities belong fresh or dry leaves were ranked by factor analysis. Fresh leaves reflect the fire resistance of normal life plants, and dry leaves reflect the fire resistance of plant’s litter. Among the 15 indexes tested, the fire performance factor index of fresh

---

收稿日期：2019-12-18
基金项目：江苏省重点研发计划项目（BE2017375-6; BE2018400）；防火及兼观赏冬青品种筛选及栽培技术推广项目（LGYB201911）[Supported by the Project of Jiangsu Province Key Research and Development（BE2017375-6; BE2018400）; Promotion Project of Fire Prevention and Ornamental Ilex Cultivars Selection and Cultivation technology（LGYB201911）]。
作者简介：杨丁（1992-），男，江苏徐州人，硕士，主要从事冬青属植物开发与应用，（E-mail）295850692@qq.com。
***通信作者：**郝明灼（1973-），博士，副教授，主要从事冬青属植物开发与应用，（E-mail）hmz@njfu.edu.cn。

leaves shows significant difference($p < 0.05$), and the other indexes show extremely significant difference($p < 0.01$). The results showed that the fire resistance rank of fresh leaves from strong to weak respectively was *Ilex cornuta* 'Burfordii', *Ilex* 'Nellie R. Stevens', *Ilex dabieshanensis, Photinia serrulata*, *Pittosporum tobira*, *Ilex dipyrena* and *Ilex* × *koehneana*; the fire resistance rank of dry leaves from strong to weak respectively was *Ilex* 'Nellie R. Stevens', *Ilex dabieshanensis*, *Ilex cornuta* 'Burfordii', *Pittosporum tobira*, *Ilex dipyrena*, *Ilex* × *koehneana* and *Photinia serrulata*. *Ilex cornuta* 'Burfordii'. To sum up, *Ilex* 'Nellie R. Stevens' and *Ilex dabieshanens* show better fire resistance ability than *Photinia serrulate* , *Pittosporum tobira* and other *Ilex* cultivated varieties.

Keywords: Fire resistence, Evergreen holly, CONE calorimeter, Factor analysis, Water content, Fire performance index

森林火灾不仅破坏生态环境，还严重威胁社会安全（Hammond et al., 2013；梁琴等，2015；裴建元等，2015），而国内雨水在空间和时间上分布不均，更增加了部分林地干旱时火灾发生的概率（张宇等，2018），此外林下枯落物自然分解也需半年以上（王敏等，2019），因此进行防火树种的筛选，用以建造防火林带变得十分重要（舒立福等，1999）。为此众多学者（Pinard & Huffman，1997；李修鹏等，2013；庞晶，2017；温开德和欧阳园兰，2018）先后开展防火树种遴选与评价工作。

冬青属（*Ilex*）植物多常绿（中国科学院中国植物志编辑委员会，1999），景观特性优良（李修鹏等，2013），目前在欧美国家已成为园林绿化中十分重要的观赏树种（郭娟等，2018）。近年来，国内引进了许多国外的冬青品种，冬青属植物在国内园林景观上的应用正逐渐增多（田如男和辛建攀，2014；钱燕萍和田如男，2016），但尚未有学者对冬青属植物的防火性能进行系统的比较。因此，十分有必要对冬青属植物新品种的防火性能进行研究，了解不同冬青品种燃烧表现和特征，为应用推广该属植物提供理论依据。

树种防火性能评价研究中常见实验材料为树干、树皮、枝条和叶片等（李世友等，2009；温开德和欧阳园兰，2018；顾汪明等，2020），未见到有鲜叶和干叶区别研究的相关报道。常用测量仪器有锥形量热仪(刘欣瑜等，2020)、微机氧弹式量热仪(杨亮等，2009)、DW 点着温度测定仪(赵凤君等，2016)等，其中锥形量热仪是目前应用较为广泛的防火性能测量仪器，可以测定出在相同热源条件下各种材料的多种燃烧特性，通过计算机处理，结果更接近火灾时各材料的燃烧情况（田晓瑞等，2001；Schartel & Bartholmai, 2005；周国模等，2008；刘波等，2008；金森和杨艳波，2016；徐晓楠，2003）。目前，树种防火性能评价方法有聚类分析法（顾汪明等，2020）、层次分析法（庞晶, 2017）、因子分析法（何晓群，2015）等。其中因子分析法可以对实验测定结果进行主成分提取，建立因子得分模型，对不同树种的防火性能进行综合评价和排序（刘欣瑜等，2020）。

1 材料与方法

1.1 实验材料与样品制备

实验材料选于南京市八卦洲青珠果园艺有限公司苗木基地。地理位置为 32°12′ N，118°49′ E，属亚热带季风气候区。

选取 10 a 生健康且长势良好的克恩氏冬青（*Ilex* × *koehneana*）、史蒂芬冬青（*Ilex* 'Nellie R. Stevens'）、大别山冬青（*Ilex dabieshanensis*）、博福德冬青（*Ilex cornuta* 'Burfordii'）、双核冬青（*Ilex dipyrena*）各 10 棵。另选同一基地内 10 a 生健康且长势良好的当地常用防火树种海桐（*Pittosporum tobira*）（张家来等，2000）和石楠（*Photinia serrulata*）（肖华和吴昌庭，2001）各 10 棵作为参照，分别记为 KES、SDF、DBS、BFD、SH、HT、SN。于 2019 年 4

月 10 号采集树冠中下部健康叶片，每份不少于 100 g，共计样品 70 份，分别装于密封袋中，置于有冰袋的采样箱中临时储存。

样品采集当日立即带回南京林业大学林学院实验室（室温 20 ℃，相对湿度 60 %）进行处理。将每份样品均分为两份，一份放回密封袋存放于采样箱；另一份称重后，置于 120 ℃烘箱烘干后再次称重，记录两次称得质量。干样置于室内回潮至质量不在增加的气干状态，得到鲜叶和干叶样品各 70 份，待试。

1.2 实验方法

1.2.1 指标测定。

用烘干法计算鲜叶含水率：$W=[(g-g_0)/g]\times100\ \%$。式中，$W$ 为鲜叶含水率；g 为待烘干鲜叶质量；g_0 为烘干叶质量。

使用锥形量热仪（CONE）测定各燃烧数据：每份样品精准称取 3 g 平铺在 100 mm × 100 mm 燃烧器皿中，氧气浓度设置为 20.85 % ~ 20.95 %，燃烧温度设置为 650 ℃（温度设置依据：烟头中心温度可达 600 ~ 700 ℃，是引起森林火灾的重要外部火源之一）（江津凡等，2012）。测定或计算鲜叶点燃时间（X_1）、鲜叶燃烧时间（X_2）、鲜叶热释放速率峰值（X_3）、鲜叶总热释放量（X_4）、鲜叶烟产生速率峰值（X_5）、鲜叶总烟释放量（X_6）、鲜叶火灾性能指数（X_7）、干叶点燃时间（G_1）、干叶燃烧时间（G_2）、干叶热释放速率峰值（G_3）、干叶总热释放量（G_4）、干叶烟产生速率峰值（G_5）、干叶总烟释放量（G_6）、干叶火灾性能指数（G_7）。

其中，$FPI=TTI/pkHRR$；FPI 为火灾性能指数，TTI 为点燃时间，$pkHRR$ 为热释放速率峰值。

共计 15 个指标作为本次防火性研究的全部变量。使用因子分析法评价防火能力。

1.2.2 数据处理与分析

使用 Excel 2016 和 spss 19.0 软件进行数据处理。

使用因子分析法进行评价分析，因子分析模型：$X_i=a_{i1}F_1+a_{i2}F_2+\ldots+a_{im}F_m+\varepsilon_i$，$i=1，2，\ldots，p$；$F_1$，$F_2$，…，$F_m$ 为彼此独立的公共因子，均满足均值为 0，方差为 1；ε_i 为特殊因子，与每一个公共因子均不相关且均值为 0。

2 结果与分析

2.1 燃烧实验结果

5 种冬青、海桐和石楠鲜叶燃烧结果（表 1）显示鲜叶的含水率、鲜叶点燃时间等 8 个指标中，火灾性能指数（X_7）差异性显著，其余指标差异性极显著；干叶燃烧结果（表 2）显示干叶点燃时间等 7 个指标均呈极显著性差异。

含水率（W）是防火性评价的重要因素（Philpot, 1997；庞晶，2017），含水率高的植物自身抗火性强，在着火前能有效阻断热源。所选的七种植物中，海桐和石楠的含水率居于一二位，并且自身适应性和抗逆性强，极易栽植，是众多园林施工及防火林的优选树种。点燃时间和燃烧时间也反映了植物的抗火性。博福德冬青鲜叶的点燃时间（X_1）和燃烧时间（X_2）与海桐和石楠的差异不明显，抗火性相近。七种冬青的干叶点燃时间（G_1）均长于海桐和石楠，抗火性较高，克恩氏冬青和博福德冬青的叶片枯落物在 650 ℃的环境中需 10 s 以上才能燃烧。克恩氏冬青和大别山冬青的干叶燃烧时间（G_2）与海桐相近，处于较高水平；博福德冬青和双核冬青的干叶燃烧时间（G_2）与石楠相近，处于较低水平。

热释放速率峰值和总热释放量表示植物燃烧时自身放热能力。大火形成后，植物放热速度快，总放热量高，不利于火灾扑救。但在火势形成前可以提供热源示警，配合遥感技术，准确定位起火点，及时扑救。七种冬青的鲜叶及干叶的热释放速率峰值和总热释放量（X_3、X_4、G_3、G_4、）均高于海桐和石楠。

烟释放速率峰值和总烟释放量表示植物燃烧时自身释烟能力，在起火前释放烟雾，更具示警效果。鲜叶测试结果中史蒂芬冬青烟产生速率峰值（X_5）、总烟释放量（X_6）和博福德冬青的总烟释放量（X_6）高于海桐和石楠，烟雾示警效果好；其余冬青的这两个鲜叶测试结果与海桐和石楠相近。史蒂芬冬青、大别山冬青、博福德冬青、双核冬青的干叶烟产生速率峰值（G_5）高于海桐和石楠，更有利于示警；史蒂芬冬青、大别山冬青、博福德冬青的干叶总烟释放量（G_6）高于海桐和石楠，示警效果好。

火灾性能指数表示燃烧时的危害性，数值越大，危害越小。博福德冬青和双核冬青的鲜叶火灾性能指数（X_7）与海桐和石楠的差异不显著，危害较小；其他冬青鲜叶火灾性能指数（X_7）小于海桐和石楠，危害较大。克恩氏冬青的干叶火灾性能指数（G_7）大于其他树种，危害最小；史蒂芬冬青、大别山冬青、博福德冬青该指标与海桐和石楠差异不显著，危害相近；双核冬青该指标最小，危害最大。

表 1 鲜叶防火性指标结果比较表

Table 1 Comparison of fresh leaf fire resistance indexes

树种 Species	W (%)	X_1 (s)	X_2 (s)	X_3 (kW·m^{-2})	X_4 (MJ·m^{-2})	X_5 (m^2·s^{-1})	X_6 (MJ·m^{-2})	X_7 (s m^2·kW^{-1})
KES	53.95±0.27e	26.33±1.70c	55.67±3.68a	162.34±48.67abc	6.28±1.50a	0.97±0.14b	3108.02±216.76b	0.17±0.04b
SDF	62.09±0.94c	32.67±3.30bc	36.33±8.34ab	215.15±26.59ab	5.59±0.29abc	2.06±0.66a	6060.73±1314.83a	0.14±0.01b
DBS	58.53±1.52d	35±2.83bc	51±16.75a	230.49±34.17ab	6.39±0.26a	1.34±0.45b	4239.65±533.96b	0.16±0.03b
BFD	53.20±1.56e	55±9.09a	18.33±1.70b	233.79±18.72a	5.84±0.16ab	1.02±0.01b	7167.14±322.66a	0.24±0.04ab
SH	64.21±0.99c	33.33±12.66bc	37.00±17.15ab	159.02±44.37bc	4.45±0.56bcd	0.75±0.24b	3152.62±1135.55b	0.3±0.17ab
HT	72.65±0.60a	54±3.27a	14.33±3.09b	125.76±11.87c	3.8±0.12d	0.57±0.03b	3397.93±567.10b	0.41±0.05a
SN	67.56±0.82b	44±4.24ab	16.33±2.62b	128.44±10.81c	4.16±0.35cd	0.65±0.11b	3550.82±610.12b	0.36±0.09a

注：同性状间的不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

Note：Different letters indicate significant differences(P<0.05). The same below.

表 2 干叶防火性指标结果比较表

Table 2 Comparison of dry leaf fire resistance indexes

树种 Species	G_1 (s)	G_2 (s)	G_3 (kW·m^{-2})	G_4 (MJ·m^{-2})	G_5 (m^2·s^{-1})	G_6 (MJ·m^{-2})	G_7 (s m^2·kW^{-1})
KES	12±1.41a	37±2.94a	311.76±30.64b	10.56±0.33a	0.87±0.12e	2319.35±175.31d	0.04±0a
SDF	6.67±0.47cd	31.67±2.49b	334.18±26.57b	9.52±0.67ab	3.4±0.15a	10250.21±494.45a	0.02±0b
DBS	8.67±1.25bc	40.33±2.49a	302.03±39.83b	9.81±0.61a	2.37±0.17b	7371.38±372.53b	0.02±0b

BFD	10± 0.82ab	25.33± 2.62c	448.95± 14.18a	9.75± 0.45a	2.39± 0.19b	6941.03± 450.79b	0.02± 0b
SH	3.67± 1.25e	26± 2.16c	340.08± 16.29b	8.58± 0.32b	2.01± 0.03c	4796.5± 517.92c	0.01± 0c
HT	5.33± 2.05de	37.67± 0.94a	220.64± 8.54c	7.01± 0.22c	1.47± 0.04d	4850.68± 496.58c	0.02± 0.01b
SN	4.67± 1.25de	25.33± 2.05c	163.13± 1.62d	4.89± 0.56d	0.64± 0.10e	1359.47± 213.45e	0.03± 0.01b

2.2 可燃性主成分提取及因子得分模型

2.2.1 鲜叶可燃性主成分提取及因子得分模型建立

通过对含水率（W）和鲜叶的 7 个指标（W、X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7）结果进行因子分析，其相关系数均＞0.3，适合进行因子分析。按照积累方差贡献率≥85%的原则，用特征值大于 1 的 2 个公共因子代替原 8 个变量，能够概括原始变量所含信息的 87.668%，如表 3 所示。

表 3 鲜叶防火性因子贡献率表

Table 3 Factor contribution rate of fresh leaf fire resistance

因子 General factor	特征根 Characteristic root	贡献率（%） Contribution probability	
		方差 Variance	累积方差 Cumulative variance
1	4.967	62.085	62.085
2	2.047	25.583	87.668

使用 Kaiser 标准化正交旋转方法，对因子载荷矩阵进行旋转，进行 3 次旋转迭代后，得载荷矩阵表 4。

表 4 鲜叶不同防火性指标因子分析表

Table 4 Factor analysis of different fire resistance indexes of fresh leaves

变量 Variable	公共因子 General factor		变量 Variable	防火性因子 Fire resistant factor	
	f_1	f_2		f_1	f_2
W	-0.758	0.357	W	-0.169	0.047
X_1	-0.058	0.955	X_1	0.108	0.381
X_2	0.267	-0.949	X_2	-0.048	-0.351
X_3	0.959	-0.060	X_3	0.264	0.100
X_4	0.794	-0.521	X_4	0.157	-0.109
X_5	0.752	-0.271	X_5	0.178	-0.012
X_6	0.864	0.475	X_6	0.307	0.305
X_7	-0.788	0.606	X_7	-0.145	0.144
特征值 Characteristic value	4.131	2.883			
方差贡献率 Variance contribution probability （%）	51.633	36.035			

经过旋转后载荷系数如表 4 所示，公因子 f_1 在鲜叶热释放速率峰值（X_3）、鲜叶总烟释放量（X_6）、鲜叶总热释放量（X_4）三个指标上荷载较高，分别为 0.959、0.864，将 f_1 解释为"鲜叶示警"因子，f_1 的方差贡献率为 51.633 %，占第一位。

公因子 f_2 在鲜叶点燃时间（X_1）、鲜叶燃烧时间（X_2）两个指标上荷载较高，分别为 0.955、

-0.949，将f_2解释为“鲜叶抗火”因子，f_2的方差贡献率为36.035%，占第二位。

由表3抗火因子得分值建立因子得分模型如下：

$$f_1=-0.169W+0.108X_1-0.048X_2+0.264X_3+0.157X_4+0.178X_5+0.307X_6-0.145X_7;$$

$$f_2=0.047W+0.381X_1-0.351X_2+0.100X_3-0.109X_4-0.012X_5+0.305X_6+0.144X_7。$$

2.2.2 干叶可燃性主成分提取及因子得分模型建立

通过对干叶的7个指标（G_1、G_2、G_3、G_4、G_5、G_6、G_7）结果进行因子分析，其相关系数均大于0.3，适合进行因子分析。按照累积方差贡献率≥85 % 的原则，用特征根大于1的3个公共因子代替原7个变量，能够概括原始变量所含信息的94.115 %，如表5所示。

表5 干叶防火性因子贡献率表

Table 5 Contribution rate of dry leaf fire resistance factors

公共因子 General factor	特征根 Characteristic root	贡献率（%）Contribution probability	
		方差 Variance	累积方差 Cumulative Variance
1	3.315	47.360	47.360
2	2.243	32.042	79.401
3	1.030	14.714	94.115

使用Kaiser标准化正交旋转方法，对因子载荷矩阵进行旋转，使载荷值在水平方向上以1和0分化，进行5次旋转迭代后，得载荷矩阵表6。

表6 干叶不同防火性指标因子分析表

Table 6 Factor analysis of different fire resistance indexes of dry leaves

变量 Variable	公共因子 General Factor			变量 variable	防火性因子 Fire Resistant Factor		
	m_1	m_2	m_3		m_1	m_2	m_3
G_1	-0.266	0.907	0.273	G_1	-0.184	0.409	0.038
G_2	0.004	0.139	0.973	G_2	0.101	-0.111	0.808
G_3	0.481	0.786	-0.350	G_3	0.050	0.373	-0.384
G_4	0.330	0.880	0.216	G_4	0.047	0.333	0.065
G_5	0.940	0.257	0.010	G_5	0.339	0.003	0.075
G_6	0.918	0.258	0.149	G_6	0.347	-0.019	0.191
G_7	-0.829	0.318	0.289	G_7	-0.330	0.199	0.090
特征值 Characteristic value	2.825	2.467	1.296				
方差贡献率 Variance contribution probability（%）	40.361	35.246	18.507				

经过旋转后载荷系数如表6所示，公因子m_1在干叶烟产生速率峰值（G_5）和干叶总烟释放量（G_6）两个指标上荷载较高，分别为0.940、0.918，将m_1解释为“干叶烟雾示警”因子，m_1的方差贡献率为40.361 %，占第一位。

公因子m_2在干叶点燃时间（G_1）、干叶总热释放量（G_4）、干叶热释放速率峰值（$G3$）三个指标上荷载较高，分别为0.907、0.880、0.786，将m$_2$解释为“干叶释热示警”因子，m_2的方差贡献率为35.246 %，仅次于m_1。

公因子 m_3 在干叶燃烧时间（G_2）上荷载较高，为 0.973，将 m_3 解释为"干叶抗火"因子，m_3 的方差贡献率为 18.507 %，占第三位。

由表 5 抗火因子得分值建立因子得分模型如下：

m_1=-0.184G_1 + 0.101G_2+ 0.050G_3 + 0.047G_4+ 0.339G_5 + 0.347G_6– 0.330G_7；

m_2=0.409G_1 – 0.111G_2 + 0.373G_3 + 0.333G_4 + 0.003G_5 – 0.017G_6+ 0.199G_7；

m_3=0.038G_1 + 0.808G_2– 0.384G_3+ 0.065G_4+ 0.075G_5 + 0.191G_6+ 0.090G_7。

2.3 叶片燃烧性排序模型建立与应用

将计算所得标准化值代入得分模型，得到各树种各公因子的得分值，即以各因子的方差贡献率占因子总方差贡献率的比重作为权重，进行加权评分，对各树种叶片防火性进行排名。

2.3.1 鲜叶燃烧性排序模型

计算 f_1、f_2，再将 f_1、f_2 代入 f=(51.633f_1 + 36.035f_2)/87.668，记作鲜叶得分，结果如表 7 所示。

表 7 鲜叶防火因子得分及排名表

Table 7 Score and ranking of fresh leaf fire factors

树种 Species	可燃物燃烧性因子 Combustibility factor f_1	f_2	f	排名 List
BFD	2266.3532	2225.9281	2249.7370	1
SDF	1918.9174	1871.3916	1899.3825	2
DBS	1363.9051	1312.5095	1342.7797	3
SN	1127.7324	1107.8039	1119.5411	4
HT	1081.2082	1065.4049	1074.7125	5
SH	1011.6099	977.9203	997.7623	6
KES	997.5276	955.1927	980.1264	7

博福德冬青和史蒂芬冬青在鲜叶防火性能评价中表现突出，在公因子 f_1"鲜叶示警"因子、f_2"鲜叶抗火"因子以及综合因子 f 的评价较高。表明在自然状态下，这两种冬青在释烟释热方面的综合警示效果好，自身抗火能力强，以及在综合防火性能上更突出。

大别山冬青在公因子 f_1、f_2 以及综合因子 f 的评价上略高于石楠和海桐，双核冬青和克恩氏冬青的评价低于石楠和海桐。

2.3.2 干叶燃烧性排序模型

计算 m_1、m_2、m_3，再将 m_1、m_2、m_3 代入 m=(40.361m_1 + 35.246m_2 + 18.507m_3)/94.115，记作干叶得分，结果如表 8 所示。

表 8 干叶防火因子得分及排名表

Table 8 Score and ranking of dry leaf fire factors

树种 Species	可燃物燃烧性因子 Combustibility factor m_1	m_2	m_3	m	排名 List
SDF	3574.6494	-71.1384	1853.4585	1870.8358	1
DBS	2574.9607	-27.5468	1323.7455	1354.2747	2
BFD	2431.3605	37.6986	1173.1949	1287.5203	3
HT	1696.7173	-11.1706	871.6861	894.8739	4
SH	1683.3189	35.5151	806.1526	893.7248	5
KES	822.2148	75.6674	353.8145	450.5235	6
SN	481.7342	35.2461	217.6913	262.6013	7

史蒂芬冬青、大别山冬青和博福德冬青在公因子 m_1“干叶烟雾示警”因子、m_3“干叶抗火因子”以及综合因子 m 的评分较高。表明这三种冬青枯落物的烟雾示警效果好，自身抗火能力强，以及综合防火能力突出。

克恩氏冬青在公因子 m_2“干叶释热示警”因子的评分最高，枯落物释热示警效果最好；博福德冬青和双核冬青在公因子 m_2 的评价上与石楠相近；其他植物公因子 m_2 的得分为负，史蒂芬冬青得分最低。

经过因子分析进行综合得分排名，供试植物鲜叶防火性从强到弱进行排序依次为：博福德冬青＞史蒂芬冬青＞大别山冬青＞石楠＞海桐＞双核冬青＞克恩氏冬青；供试植物干叶防火性从强到弱排序为：史蒂芬冬青＞大别山冬青＞博福德冬青＞海桐、双核冬青＞克恩氏冬青＞石楠。

3 讨论与结论

骆文坚等（2006）、李树华等（2008）曾对红果冬青(*Ilex chinensis*)、大叶冬青(*Ilex latifolia*)、铁冬青（*Ilex rotunda*）、枸骨（*Ilex cornuta*）等进行过防火测试，但缺少参照的防火树种，没有形成系统的针对冬青属植物防火性能评价的标准。此外，国内外未见到有冬青防火方面的文献。近年来，克恩氏冬青、史蒂芬冬青、大别山冬青、博福德冬青和双核冬青在市场上非常受欢迎，这些冬青品种在庭院及小区中，可独立成景，枝叶量大，耐修剪，红果经冬不落，亦可与其他植物组合造景，景观效果优良。此外，冬青属植物抗逆性强，栽植易成活，是良好的蜜源植物，可为鸟类越冬提供越冬食物，具有良好的生态功能（李修鹏等，2013；钱燕萍和田如男，2016）。海桐和石楠，被认为是较好的防火树种（张家来等，2000；肖华和吴昌庭，2001），也是国内营造防火林带的常见树种，冬青属植物与这两种树种进行防火性能比较有很大的参考应用价值。通过对不同植物叶片材料防火性能的综合评价，发现史蒂芬冬青、大别山冬青、博福德冬青的防火性能优于海桐和石楠。

目前对于植物防火性能的研究主要集中于植物的树皮、枝条和叶片（刘欣瑜等，2020；梁琴等，2015；苏文静等，2017；江津凡等，2012；裴建元等，2015）。树皮起到保护树干的作用，火灾时可在一定程度上抵御火烤。而叶片是植物最外层的部分，也是最容易着火的部位（祝必琴等，2011），起到阻隔火势的作用。为减缓火势的蔓延，叶片应是植物防火性评价的重点。

影响植物防火能力的因素很多，如：含水率（Philpot, 1997）、材料的厚度和密度（Vanderweide & Hartnett, 2011）、纹理和质地（Lawes et al., 2011）、有机化合物含量（Lillis et al., 2009）等。而不同植物含有的有机化合物种类各异（王怡晨等，2019；曹媛媛等，2019），冬青也大多含有萜类、酚类等（Chen et al., 2019；Li & Row, 2018）。究其根本，植物燃烧时的表现才是反映其防火能力强弱的关键。因此本文使用锥形量热仪模拟真实燃烧环境，直接测试叶片燃烧时的各种指标，以此评判植物的防火能力。采用因子分析法，对各项指标提取出主成分后建立评分模型，使研究结果更加科学可靠。

通过区别鲜叶和干叶材料的差异，研究发现同一种植物干叶和鲜叶的防火阻燃能力存在差异，不同树种或品种防火性能的排序也发生了变动。实际情况中，火灾发生后，冬青类的植物叶量非常大，叶片成簇密集，又在植株的最外围，鲜叶会成为阻燃的第一道防线。而叶量大的常绿树种叶片调落物也不容忽视，气干状态下的叶片防火指标则较好地反映了地面调落物的阻燃能力。

本文是在特定时期，仅针对叶片，从燃烧实验参数等方面开展的相关研究。不同的植物器官、不同季节、不同的实验测定方法会影响防火性能的评价结果。叶片的形态、空间分布结构、叶片生物量、叶片的生长状况和生理指标对植株的防火性能也有一定的影响。特定的

冬青品种还可能具备特殊的防火功能，采用常规的实验方法不能发现其特异性。冬青新品种的防火性能测定方法及其不同季节动态变化规律还有待进一步研究。仅考虑叶片的防火性能是本文的不足之处，植物其他组织的防火性能也不容忽视，在接下来的研究中，应全面考虑植物各器官的防火性能，进行综合评判。

参考文献：

CAO YY, JIA FF, WU QK, et al., 2019. Analysis of volatile components in different flowering stages in six species of *Styrax* spp. [J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 43(4): 48-56.[曹媛媛, 贾斐斐, 吴岐奎, 等, 2019. 野茉莉属 6 个树种不同时期花香成分分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 43(4): 48-56.]

CHEN W, ZHOU L, QIAO Y, et al., 2019. Quality evaluation of *Ilex asprella* based on simultaneous determination of five Bioactive Components, Chlorogenic Acid, Luteoloside, Quercitrin, Quercetin, and Kaempferol, using UPLC-Q-TOF MS study[J]. J AOAC Int, 102(5): 1414-1422.

GU WM, LU ZX, HUANG CL, et al., 2020. Screening study of fire resistant tree species in Jianshui County, Yunnan Province of southwestern China[J]. J Beijing For Univ, 42(2): 49-60.[顾汪明, 卢泽洋, 黄春良, 等, 2020. 云南省建水县防火树种筛选研究[J]. 北京林业大学学报, 42(2): 49-60.]

GUO J, QIU S, LIU HH, et al., 2018. Research on medium screening for in vitro germination and storage conditions of 4 *Ilex* species[J]. J NW For Univ, 33(6): 124-132.[郭娟, 邱帅, 刘华红, 等, 2018. 4 种冬青属植物花粉离体培养基筛选和贮藏条件的研究[J]. 西北林学院学报, 33(6): 124-132.]

HAMMOND DH, STRAND EK, HUDAK AT, et al., 2019. Boreal forest vegetation and fuel conditions 12 years after the 2004 Taylor Complex fires in Alaska, USA[J]. Fire Ecol, 15(1): 1-19.

HE XQ, 2015. Multivariate statistical analysis[M]. DSM-IV. Beijing: China People's University Press: 142-169.[何晓群, 2015. 多元统计分析[M]. 第 4 版. 北京: 中国人民大学出版社: 142-169.]

JIANG JF, WAN FX, SUN X, 2012. Analysis of 8 fire resistance tree species of fire-preventing forest belts in Xuyi county, China[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 36(2): 151-154.[江津凡, 万福绪, 孙祥, 2012. 苏北防火林带 8 种主要树种抗火能力的分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 36(2): 151-154.]

JIN S, YANG YB, 2016. Comparison of one dimensional and three dimensional flammability evaluation: a case study of taking leaves of seven tree species in southern China[J]. Sci Silva Sin, 52(8): 88-95.[金森, 杨艳波, 2016. 基于锥形量热仪的一维和三维燃烧性评价比较: 以南方 7 种树叶为例[J]. 林业科学, 52(8): 88-95.]

LAWES MJ, RICHARDS A, DATHE J, et al., 2011. Bark thickness determines fire resistance of selected tree species from fire-prone tropical savanna in north Australia[J]. Plant Ecol, 212(12): 2057-2069.

LI G, ROW K H, 2018. Selective extraction of 3,4-dihydroxybenzoic acid in *Ilex chinensis* Sims by meticulous mini-solid-phase microextraction using ternary deep eutectic solvent-based molecularly imprinted polymers[J]. Anal Bioanal Chem, 410(30): 7849-7858.

LI SH, LI YM, REN BB, et al., 2008. Fire-resistant function of landscape plants and plant arrangement of fireproof green space[J]. Landscape Architect, (6): 92-97.[李树华, 李延明, 任

斌斌, 等, 2008. 园林植物的防火功能以及防火型园林绿地的植物配置手法[J]. 风景园林, (6): 92-97.]
LI SY, MA AL, ZHU L, et al., 2009. Preliminary studies on fire resistance of *Pinus armandii* Bole[J]. J NW For Univ, 24(2): 105-107. [李世友, 马爱丽, 朱丽, 等. 2009 华山松树干耐火性初步研究[J]. 西北林学院学报, 24(2): 105-107.]
LI XP, YANG XD, YU SQ, et al., 2013. Functional trait-based evaluation of plant fireproofing capability for subtropical evergreen broad-leaved woody plants[J]. Acta Ecol Sin, 33(20): 6604-6613.[李修鹏, 杨晓东, 余树全, 等, 2013. 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价[J]. 生态学报, 33(20): 6604-6613.]
LIANG Q, TAO JP, DENG F, et al., 2015. Fire resistance of leaves during fire prevention period of nine common tree species in karst mountain regions[J]. Sci Silva Sin, 51(3): 102-108.[梁琴, 陶建平, 邓锋, 等, 2015. 喀斯特山区 9 种常见树木叶片在防火期的阻火性分析[J]. 林业科学, 51(3): 102-108.]
LILLIS MD, BIANCO PM, LORETO F, 2009. The influence of leaf water content and isoprenoids on flammability of some Mediterranean woody species[J]. Int J Wildland Fire, 18(2): 203-212.
LIU B, YU SQ, ZHOU GM, et al., 2008. Combustibility of *Schima superba* leaves using a cone calorimeter[J]. J Zhejiang A&F Univ, 25(1): 69-71.[刘波, 余树全, 周国模, 等, 2008. 利用锥形量热仪测试木荷燃烧性能的方法探讨[J]. 浙江林学院学报, 25(1): 69-71.]
LIU XY, WANG Q, LIU XL, 2019. Fire resistance of 13 landscaping tree species in Beijing[J]. J Chin Urban For, 17(6): 47-52. [刘欣瑜, 王琦, 刘秀丽, 2019. 北京地区 13 种常绿树种抗火性能研究[J]. 中国城市林业, 17(6): 47-52.]
LUO WJ, ZHOU ZC, FENG JM., 2006. Selection and application of excellent bio-fire tree species in Zhejiang Province[J]. J Zhejiang For Sci Technol, 26(3): 54-58.[骆文坚, 周志春, 冯建民, 2006. 浙江省优良生物防火树种的选择和应用[J]. 浙江林业科技, 26(3): 54-58.]
PANG J, 2017. Water characteristics and fire performance of several fire resistance tree species[J]. Protect Forest Sci Technol, (9): 75-76.[庞晶, 2017. 几种防火树种的水分特性与防火性能分析[J]. 防护林科技, (9): 75-76.]
PEI JY, YAN YY, YE Q, et al., 2015. Study on physical and chemical properties of 10 evergreen broad leaf treespecies[J]. J Cent S Univ of For Technol (Nat Sci Ed), 35(2): 16-21.[裴建元, 严员英, 叶清, 等, 2015. 10 种常绿阔叶树种理化性质的研究[J]. 中南林业科技大学学报(自然科学版), 35(2): 16-21.]
PHILPOT CW, 1977. Vegetative features as determinants of fire frequency and intensity[R]. Palo Alto, CA: Usda Forest Service: 12-16.
PINARD MA, HUFFMAN J, 1997. Fire resistance and bark properties of trees in a seasonally dry forest in eastern Bolivia[J]. J Trop Ecol, 13(5): 727-740.
QIAN YP, TIAN RN, 2016. Research advance of *Ilex* germplasm resources and their application to landscape[J]. World For Res, 29(3): 40-45.[钱燕萍, 田如男, 2016. 冬青属种质资源及其园林应用研究进展[J]. 世界林业研究, 29(3):40-45.]
SCHARTEL B, BARTHOLMAI M, Knoll U， 2005. Some comments on the use of cone calorimeter data[J]. Polym Degrad Stabil, 88(3): 540-547.
SHU LF, TIAN XR, LIN QZ, 1999. The theory and application of fire-resistant forest belts[J].J NE For Univ, 27(3): 71-75.[舒立福, 田晓瑞, 林其昭, 1999. 防火林带的理论与应用[J]. 东北林业大学学报]

Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita, 1999. Flora Reipublicae Popularis Sinicae Tomus 45(2)[M]. Beijing: Science Press: 2-3.[中国科学院中国植物志编辑委员会, 1999. 中国植物志第四十五卷（第二分册）[M]. 科学出版社: 2-3.]

SU WJ, LI SY, WANG QH, et al., 2017. The pyrolysis characteristics of the bark of 3 main afforestation tree species in Central Yunnan[J]. J SE For Univ (Nat Science), 37(1): 188-192.[苏文静, 李世友, 王秋华, 等, 2017. 滇中 3 个主要造林树种树皮的热解特性[J]. 西南林业大学学报, 37(1): 188-192.]

TIAN R N, XIN J P, 2014. Research progress of holly in Europe[J].Develop for sci technol, 28(05): 12-17.[田如男, 辛建攀, 2014. 欧洲冬青研究进展[J]. 林业科技开发, 28(05): 12-17.]

TIAN XR, HE QT, SHU LF, 2001. Application of cone calorimeter for the assessment of the fire resistance of tree species[J]. J Beijing For Univ, 23(1): 48-51.[田晓瑞, 贺庆棠, 舒立福, 2001. 利用锥形量热仪分析树种阻火性能[J]. 北京林业大学学报, 23(1): 48-51.]

VANDERWEIDE BL, HARTNETT DC, 2011. Fire resistance of tree species explains historical gallery forest community composition[J]. Forest Ecol Manag, 261(9): 1530-1538.

WANG M, RONG L, YU GS, et al., 2019 Decomposition of litters in Maolan karst forest degradation area[J]. Guihaia, 39(8): 1081-1091.[王敏, 容丽, 俞国松, 等, 2019. 茂兰喀斯特森林退化区凋落物的分解动态[J]. 广西植物, 39(8): 1081-1091.]

WANG YC, SUN HY, LI YR, et al., 2019. Analysis of the variation in yield and oil quality traits of selected *Paeonia ostii* 'Feng Dan' individuals[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 43(4): 155-160.[王怡晨, 孙海燕, 李永荣, 等, 2019. 油用牡丹'凤丹'单株结实量及产油品质分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 43(4): 155-160.]

WEN KD, OUYANG YL, 2018. Study on bark fire resistance of 11 evergreen broadleaved tree species[J]. S China Sci, 46(1): 50-53.[温开德, 欧阳园兰, 2018. 11 种常绿阔叶树的树皮抗火性研究[J]. 南方林业科学, 46(1): 50-53.]

XIAO H, WU CT, 2001. Construction technology of *Photinia serrulata* fire resistance[J]. J For Eng, 15(s1): 88.[肖华, 吴昌庭, 2001. 石楠防火林带营造技术[J]. 林业工程学报, 15(s1): 88.]

XU XN, 2003. Application of the new evaluation method in the research of flame -Retardant[J]. China Safety Sci J, 13(1): 19-22.[徐晓楠, 2003. 新一代评估方法--锥形量热仪(CONE)法在材料阻燃研究中的应用[J]. 中国安全科学学报, 13(1): 19-22.]

YANG L, ZHUANG S, DAI DF, et al., 2009. The error analysis in determination of combustion heat by oxygen bomb[J]. Fire Sci Technol, 28(7):519-521.[杨亮, 庄爽, 戴殿峰, 等, 2009. 氧弹量热仪测定物质燃烧热值的误差分析[J]. 消防科学与技术, 28(7): 519-521.]

ZHAGN JL, ZENG XF, LIU XQ, et al., 2000. Study on selection of fire prevention tree species in Hubei Province[J]. J Huazhong Agr Univ, 19(1): 84-90.[张家来, 曾祥福, 刘学全, 等, 2000. 湖北森林防火树种选择的研究[J]. 华中农业大学学报, 19(1): 84-90.]

ZHANG Y, WANG ZL, SHA S, et al., 2018. Drought events and its causes in summer of 2018 in china[J]. J Arid Meteorol, 36(5): 172-180.[张宇, 王芝兰, 沙莎, 等, 2018. 2018 年夏季全国干旱状况及其成因[J]. 干旱气象, 36(5): 172-180.]

ZHAO JF, WANG QH, SHU LF, et al., 2016. Correlations between supercritical extracts of coniferous fuel and the heat yield value and ignition point[J]. Sci Silva Sin, 52(4): 71-77.[赵凤君, 王秋华, 舒立福, 等, 2016. 大兴安岭针叶可燃物的热值和燃点与其超临界萃取物含量的相关性[J]. 林业科学, 52(4): 71-77.]

ZHOU GM, ZHOU YF, YU SB, et al., 2008. Combustibility of litters of three woody species with

different water contents by cone calorimeter[J]. Sci Silva Sin, 44(5): 96-101.[周国模, 周宇峰, 余树全, 等, 2008. 利用锥形量热仪研究不同含水率的树种枯落物燃烧性[J].林业科学, 44(5):96-101.]

ZHU BQ, HUANG SE, TIAN J, et al., 2011. A study on the physical-chemical properties and flammability of different forest types in semi-tropical monsoon area[J]. Acta Agr Univ Jiangxiensis, 33(6): 1149-1154.[祝必琴, 黄淑娥, 田俊, 等, 2011. 亚热带季风区不同林型可燃物理化性质及燃烧性研究[J]. 江西农业大学学报, 33(6): 1149-1154.]